

ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD TEMPORAL DE LA HUMEDAD DEL SUELO EN UNA CUENCA MEDITERRÁNEA SOBRE MATERIAL GRANÍTICO

V. García-Gamero^{1*}, J.V. Giráldez^{1,2}, A. Peña³, A.M. Laguna⁴, T. Vanwalleghem¹, G. Martínez-García⁴, K. Vanderlinden⁵

¹Depto. de Agronomía, Universidad de Córdoba, Edif. Da Vinci, Ctra. Madrid km 396, 14071 Córdoba. e-mail: g02gagav@uco.es

²Depto. de Agronomía, Instituto de Agricultura Sostenible, CSIC, Avda. Menéndez Pidal s/n. 14004 Córdoba. e-mail: aglgicej@uco.es

³Depto. de Ingeniería Rural, Construcciones civiles y Proyectos de Ingeniería, Universidad de Córdoba, Edif. Da Vinci, Ctra. Madrid km 396, 14071 Córdoba. e-mail: ir1peala@uco.es

⁴Depto. de Física Aplicada, Radiología y Medicina Física, Universidad de Córdoba, Edif. C2, Ctra. Madrid km 396, 14071 Córdoba. e-mail: fallalua@uco.es

⁵IFAPA Centro Alameda del Obispo, Avda. Menéndez Pidal s/n, 14004 Córdoba. karl.vanderlinden@juntadeandalucia.es

RESUMEN. En una investigación realizada en la Sierra Morena, cerca de Cardeña (Córdoba), en el marco de un proyecto que estudia los procesos de formación del suelo, se instaló una red de sensores de humedad del suelo a lo largo de dos laderas con orientación opuesta, norte-sur. El estudio de la estabilidad temporal refleja que los puntos localizados en la ladera orientada al norte son temporalmente más estables en las diferentes profundidades (0.05, 0.15, 0.25, 0.35 y 0.45 m) en las que se monitoriza la humedad del suelo. Sin embargo, los puntos situados en el valle presentan una menor estabilidad temporal. El Análisis de Componentes Principales (CPs) reduce la complejidad del conjunto de datos, describiendo los dos primeros CPs el 97.5 % de la varianza total. El CP 1 explica el 92.5 % de la varianza pudiendo identificarse con el clima, mientras que el CP 2 explica el 5.1 % de la varianza pudiendo identificarse con la topografía y su influencia en la hidrología de las laderas.

ABSTRACT. To study the effects of soil hydrology on soil formation a network of soil moisture sensors was installed along two opposite north-south slopes in a *dehesa* farm in Sierra Morena near Cardeña (Córdoba). A temporal stability analysis of soil moisture showed that the sites located on the north-facing slope exhibited a greater temporal stability at the different depths (0.05, 0.15, 0.25, 0.35 y 0.45 m) at which soil moisture was monitored than on the south-facing slope and in the valley bottom. Principal Component Analysis (PCA) was used to reduce the dimensions of the data set, with the first two PCs explaining 97.5 % of the total variance. PC 1 explained 92.5 % of the variance and could be related with climatic conditions, while PC 2 explained 5.1 % of the variance and could be linked to topography and its influence on the hydrology of both slopes.

pues resulta fundamental para mejorar el modelado climático e hidrológico, optimizar las redes de sensores de esta variable o validar las mediciones obtenidas por teledetección (Brocca et al., 2010; Robinson et al., 2008).

Vachaud et al. (1985) introdujeron el término de estabilidad temporal de la humedad del suelo (ETS) para identificar puntos representativos de la humedad media de una zona de estudio. Desde entonces, se han realizado numerosos trabajos, no solo a diferentes escalas, espacial y temporal, sino también considerando diferentes características del suelo, tipos de vegetación y utilizando diferentes dispositivos de medición. Martínez-Fernández y Ceballos (2003) analizaron la ETS en una superficie de 1285 km² en el noroeste de la Península Ibérica con mediciones efectuadas durante 3 años. Brocca et al. (2009) exploraron la ETS en tres lugares de una región interior de Italia central caracterizada por un clima Mediterráneo y Zhao et al. (2010) también la estudiaron en una estepa semiárida de la región de Mongolia interior en China caracterizada por un clima continental.

Vanderlinden et al. (2012) revisaron la extensa literatura con el objetivo de desenmarañar los aspectos que controlan dicha ETS. Los sensores de medida usados y la densidad espacial de puntos, la escala espacial y temporal, las propiedades del suelo incluyendo la profundidad, la vegetación, la topografía, el clima y su estacionalidad influyen en la estabilidad temporal. Sin embargo, estos autores destacan que la combinación de e de estos factores explica mejor su variación que cualquiera de ellos por separado.

Tras centenares de estudios, Fry & Guber (2020) en un examen reciente de una parcela cultivada en Mason, Michigan (EEUU) siguen manteniendo que no se conoce bien aún el efecto combinado de estos factores sobre la ETS, debido a la complejidad de las interrelaciones entre ellos. Ellos concluyeron que la topografía y la hidrología ejercen una influencia mayor que el resto de los factores aisladamente.

Por ello, además del método más ampliamente empleado para evaluar la ETS, se usa la diferencia media relativa, (MRD)(Vachaud et al., 1985). Otro método de análisis estadístico ampliamente aceptado para discernir los principales factores que pueden explicar la variabilidad espaciotemporal de la humedad del suelo es el análisis de componentes principales (ACP) (Martini et al., 2017).

1.- Introducción

La humedad del suelo es una variable significativa, no por el volumen que representa, sino por su impacto en el balance hídrico y energético (Choi & Jacobs, 2007).

El estudio de la humedad del suelo y su variabilidad espacio-temporal ha sido objeto de numerosos trabajos

El ACP permite identificar patrones dentro del conjunto de datos y su relación con las características del paisaje (Jawson & Niemann, 2007). Este método, se hizo popular en áreas científicas como la meteorología (Kim, 1996) y se ha aplicado en hidrología desde la escala de campo (Yoo & Kim, 2004) hasta los 10000 km² que abarcan la región subhúmeda del estado de Oklahoma (EEUU) (Kim & Barros, 2002), por su potencial para reducir la dimensionalidad de los conjuntos de datos de las variables medidas.

En la región Mediterránea en el sur de la Península Ibérica, en una zona en la que subyace roca granítica, se ha estudiado la influencia de la orientación del terreno en la humedad del suelo en dos laderas con orientación opuesta, norte-sur (García-Gamero et al., 2021). La gran diferencia en la estructura de la zona crítica en esta superficie de estudio requiere un estudio más detallado de ella considerando un mayor número de puntos de medida. El objetivo de este trabajo es mostrar el estudio de la ETS medida en una red de sensores instalados a lo largo de 2 laderas con orientación opuesta durante 3 años. Los objetivos específicos del trabajo son: (i) conocer el patrón temporal en cada una de las estaciones y del conjunto de éstas; (ii) analizar cómo varían estos patrones en función de la profundidad, y (iii) aplicar un ACP para identificar tendencias en el conjunto de datos medidos de la humedad del suelo medida y los factores que controlan su variabilidad espaciotemporal.

2.- Material y métodos

2.1. Área de estudio

El estudio fue realizado en una cuenca situada en Cardaña (Córdoba) (38.2° N; 4. 17° W). Se seleccionaron dos laderas con orientación opuesta para la instalación de puntos de medida de la humedad del suelo, (Fig. 1).

El clima de la zona se clasifica como Mediterráneo continental (BSk) en el diagrama de Köppen-Geiger (Peel et al., 2007), con una precipitación de 878 mm (1981-2010) y una temperatura media anual de 15.3°C (Carpintero et al., 2020).

Se trata de una zona de dehesa cubierta por árboles del género *Quercus* spp. y pastos anuales (*Olea* & San Miguel-Ayanz, 2006).

El material parental que subyace en toda la cuenca es el granito con unidades de granodiorita (Carracedo et al., 2009). La clase textural del suelo varía principalmente entre arenosa y franco arenosa (Román-Sánchez et al., 2018).

El terreno es accidentado, con una elevación que oscila entre los 650 y los 725 m. s. n. m.

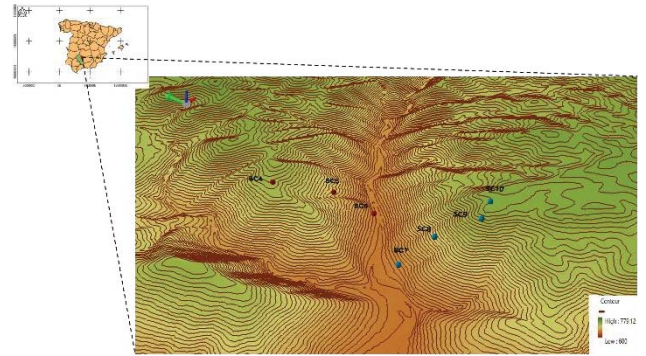


Fig. 1. Localización de la zona de estudio en Cardaña (Córdoba) con los puntos de monitorización de la humedad del suelo localizados en la ladera con orientación sur (SC4-SC6) (puntos rojos) y aquellos localizados en la ladera con orientación norte (SC7-SC10) (puntos azules). Las curvas de nivel se representan para un intervalo de 2 m.

2.2. Medida de la humedad del suelo

La medida de la humedad del suelo y la normalización de los datos se realizó siguiendo el mismo método de García-Gamero et al. (2021).

Se normalizó la humedad del suelo, θ , como el grado de saturación efectiva (e.g. Brutsaert, 2005):

$$s = \frac{\theta - \theta_{min}}{\theta_{max} - \theta_{min}} \quad (1)$$

Se seleccionaron siete localizaciones (SC4-SC10) para instalar los sensores de la humedad del suelo, que se dispusieron a diferentes profundidades (0.05, 0.15, 0.25, 0.35 y 0.45 m, excepto en los puntos SC4 y SC5 en los que el perfil de suelo era tan somero, con un frente de meteorización de la roca muy próximo a la superficie que impidió la inserción de los dos últimos, y del último sensor, respectivamente).

El periodo de medida se extiende desde el 29-11-2016 al 8-11-2019. Las medidas se toman en intervalos de 30 min desde noviembre de 2016 a enero de 2018 y de 10 min desde enero de 2018 a noviembre de 2019. Se promediaron diariamente los datos empleados en este análisis.

2.3. Estabilidad temporal de la humedad del suelo

Para cuantificar la desviación de la humedad del suelo respecto al promedio de las 7 localizaciones de medida de la humedad del suelo, para cada instante de tiempo, profundidad y localización, se calcularon las diferencias relativas (RD) (Vachaud et al., 1985):

$$RD_i^j = \frac{(s_i^j - \bar{s}^j)}{\bar{s}^j}, \quad (2)$$

siendo s_i^j el grado de saturación efectiva a una determinada profundidad en el sitio i y tiempo j . \bar{s}^j es el grado de saturación efectiva medio a una determinada

profundidad para un instante de tiempo j para los 7 puntos de medida. La diferencia media relativa (MRD_{*i*}), se calculó a partir de las RD:

$$MRD_i = \frac{1}{N_j} \sum_j^{N_j} RD_i, \quad (3)$$

siendo N_j el número de días de medida. Se excluyeron del análisis las filas del conjunto de datos diarios sin datos (debido a fallos en los dispositivos de medida). De este modo, se incluyeron solo las fechas para las que hay datos de humedad del suelo en las 7 localizaciones, esto es, 7 datos por cada día. Al considerar únicamente las observaciones completas se limitó en gran medida el número de datos empleados, desechándose un gran número de observaciones.

Un valor positivo de MRD, para una localización, indica que dicho punto es más húmedo que la media, mientras que un valor negativo de MRD indica que la localización es más seca que la media.

La estimación de la desviación típica de la RD se usa para cuantificar la ETS en estas localizaciones. La desviación típica (SDRD_{*i*}) se calcula para cada profundidad y localización:

$$SDRD_i = \sqrt{\frac{1}{N_j - 1} \sum_{j=1}^{N_j} (RD_i^j - MRD_i)^2} \quad (4)$$

Los valores pequeños de SDRD_{*i*} indican una mayor ETS en esos puntos. Todos los análisis en este estudio se efectuaron usando los programas de R-Studio (RStudioTeam, 2020).

2.4. Análisis de Componentes Principales

Para analizar los factores que subyacen como responsables de la variabilidad de la humedad del suelo, se realizó un ACP. Este análisis transforma el conjunto original de variables en otro conjunto de variables no correlacionadas llamadas componentes principales (CPs), que conservan la mayoría de la información contenida en las originales. Los resultados se evalúan en base a las cargas o *loadings* de los CPs que indican la relevancia que tiene cada variable en cada componente y la puntuación de cada observación o *score* que indica la distancia desde el origen a cada proyección. Para más detalles sobre el ACP o también denominado análisis de Funciones Ortogonales Empíricas (FOE) se puede consultar el artículo de Perry y Niemann (2007)

Como variables de entrada, se usaron los datos de saturación efectiva, s , medidos en los 7 puntos de monitorización (SC4_AVG-SC10_AVG), promediados diariamente para la profundidad del perfil del suelo para

el periodo 29-11-2016 a 08-11-2019. Los valores mayores o iguales a 0.5 corresponden al periodo húmedo, los menores e iguales que 0.25 al periodo seco y el resto sea un periodo denominado, en este caso, intermedio. El ACP se realizó con el paquete *factoextra* (ver. 1.0.7) del conjunto de programas R-Studio.

3.- Resultados y Discusión

3.1. Perfiles de humedad del suelo

La Fig. 2 muestra los valores medios del grado de saturación efectiva, s , y la desviación típica para las diferentes profundidades en las que se midió la humedad del suelo durante el periodo de estudio.

En la zona próxima a la superficie, 0.05 m, el punto SC7 localizado en el valle, en el pie de la ladera orientada al norte, es el que muestra el mayor valor medio de s (Fig. 2 a). Así mismo, corresponde al punto que presenta una mayor desviación típica a esta profundidad (Fig. 2 b), probablemente por la posición topográfica en la que se encuentra. Por el contrario, el punto SC4, en la cima de la ladera orientada al sur, es el que presenta el menor valor de s a esta profundidad.

A 0.15 y 0.25 m, el punto SC6 localizado en el valle, en el pie de la ladera orientada al sur, es el que muestra los valores medios de s mayores, e, igualmente, tiene también los mayores valores de la desviación típica, lo que refleja la gran variabilidad temporal de la humedad del suelo en este punto. En estas profundidades los puntos SC9 y SC8, localizados en la parte alta y media de la ladera orientada al norte, respectivamente, presentan los valores medios de s más pequeños. Este hecho está probablemente relacionado con la estructura de la zona crítica en esta ladera con una zona vadosa muy meteorizada que se extiende hasta los 9.50 m en la zona media de ésta, en la que las abundantes fracturas y/o macroporos facilitarían el flujo preferencial no saturado (Nimmo et al., 2012) muy diferente a la estructura de la zona crítica en la ladera orientada al sur donde la roca madre subyace justo debajo del perfil del suelo a escasos 0.6 m de profundidad (García-Gamero et al., 2021). Estos puntos se encuentran entre aquellos que muestran los valores más bajos de desviación típica en ambas profundidades (Fig. 2 b).

Por el contrario, a mayor profundidad, 0.35 y 0.45 m el punto SC9, aunque también con valores de desviación típica elevados, da los valores medios de s mayores, lo que podría indicar una acumulación de agua en dicha profundidad. Sin embargo, tanto a los 0.35 m como a los 0.45 m, al punto SC8 situado en la zona media de la misma ladera, le corresponde el menor valor medio de s . Esto podría deberse a la existencia de flujo de agua preferencial vertical y lateral en la ladera (García-Gamero et al., 2021; Zhang et al., 2018).

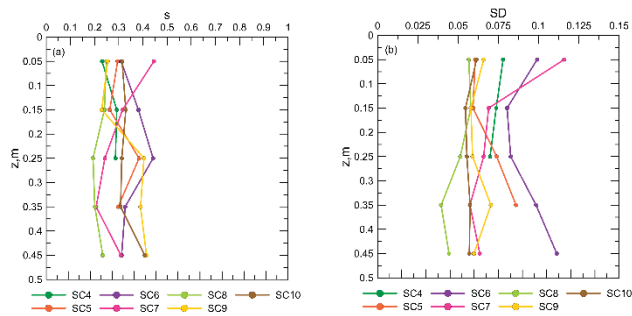


Fig. 2. (a) Saturación efectiva media, s y (b) desviación típica (SD) de la saturación efectiva en función de la profundidad para las 7 localizaciones (SC4-SC10).

3.2. Estabilidad temporal de la humedad del suelo

La Fig. 3 muestra los valores de MRD, indicando la desviación típica con unas barras de error, para las diferentes profundidades: 0.05 (3a), 0.15 (3b), 0.25 (3c), 0.35 (3d) y 0.45 (3e) m. Para cada una de las 5 profundidades la SDRD promediada, la desviación típica indicada entre paréntesis fue de 0.33 (± 0.07), 0.36 (± 0.13), 0.46 (± 0.22), 0.59 (± 0.24) y 0.61 (± 0.14), respectivamente. En términos generales, los valores de SDRD son más altos a mayor profundidad y en puntos localizados en la zona del valle o pie de la ladera, principalmente punto SC6, y en menor medida SC7. Las características de la zona crítica subsuperficial de la ladera orientada al norte, mencionadas anteriormente, facilitarían el flujo de agua preferencial no saturado, permitiendo así una conectividad hidrológica lateral en la ladera lo que puede explicar esta gran variabilidad respecto a la media espacial con la profundidad. Además, en la parte baja de la ladera, punto SC7, puede generarse escorrentía resultado de este flujo subsuperficial procedente tanto de la zona vadosa como de la zona saturada (exfiltración), lo que también explicaría la gran variabilidad en este punto (García-Gamero et al., 2021). En la ladera orientada al sur, la roca madre subyace directamente bajo el perfil del suelo por lo que el escaso espesor dificultaría este flujo lateral de agua. Sin embargo, la proximidad del punto SC6 al arroyo Martín Gonzalo y su influencia podría generar esa gran variación con respecto al valor medio espacial de la humedad del suelo.

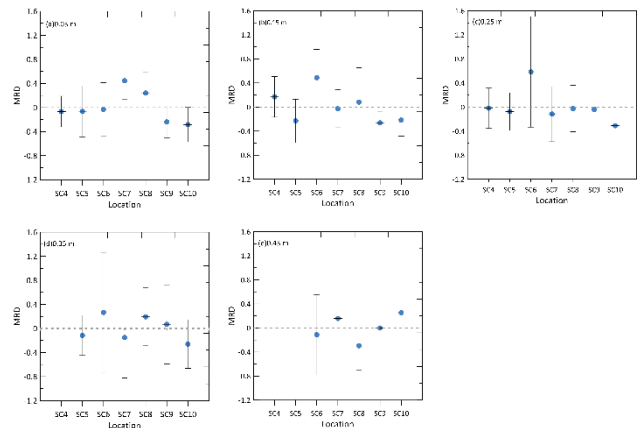


Fig. 3. Diferencias relativas medias (MRD) indicando la desviación estándar (barras verticales) para la humedad del suelo medida a cinco profundidades (0.05,0.15,0.25,0.35 y 0.45 m) en las localizaciones SC4-SC10.

Lin (2006) en un estudio realizado en el Observatorio de la zona crítica de Shale Hills en Pennsylvania (EEUU) encontró que los puntos de medida localizados a lo largo del valle duplicaban el contenido volumétrico medio de agua en el suelo de la cuenca mientras que los puntos localizados en las laderas eran de 30 a 50% más secos. En este estudio, también el punto SC6 muestra una humedad del suelo muy superior a la media, excepto a los 0.05 m donde es el punto SC7, localizado en una posición similar en la ladera opuesta, el que da un valor más alto y a los 0.45 m. Por el contrario, el punto SC10, en la parte alta de la ladera orientada al norte, presenta una humedad del suelo muy inferior a la media, excepto a los 0.15 and 0.45 m. Precisamente a esta última profundidad la situación se invierte pues la localización SC10 es más húmeda que la media.

La Fig. 4 muestra los valores de MRD y SDRD en función de la profundidad. En esta figura destaca la localización SC6 como el punto más húmedo para el perfil del suelo, excepto para 0.05 y 0.45 m. Por el contrario, SC10 es la localización más seca con una humedad del suelo muy inferior al valor medio, excepto para 0.15 y 0.45 m.

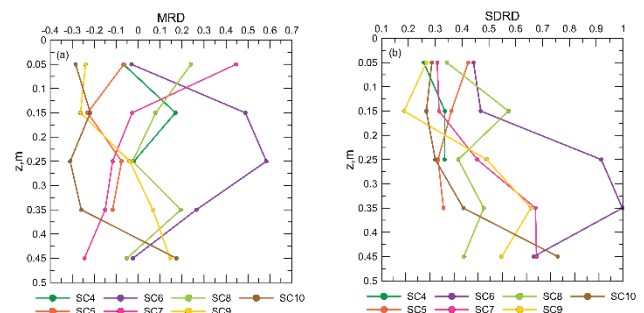


Fig. 4. (a) Diferencia media relativa (MRD) y (b) desviación típica de la diferencia relativa (SDRD) en función de la profundidad para las 7 localizaciones (SC4-SC10).

Considerando los valores de MRD, la localización que representa la humedad del suelo promedio de la cuenca, para el periodo estudiado, corresponde a SC6 para 0.05 m de profundidad, SC7 para 0.15 m, SC4 para 0.25 m, y SC9 para 0.35 m y 0.45 m, siendo esta última la única localización que representa por duplicado la humedad del suelo promedio de la cuenca para dos profundidades distintas. Sin embargo, los valores de SDRD identifican otros puntos como aquellos representativos de la estabilidad temporal por presentar un valor más bajo de SDRD.

Estos puntos representativos son temporalmente más estables, situados en las laderas. Las localizaciones SC6 y SC7 muestran los valores de SDRD más altos. En general, los puntos más estables se encuentran en la ladera orientada al norte para las diferentes profundidades (Fig. 3 y Fig. 4): SC4 para la profundidad 0.05m; SC9 para la profundidad 0.15 m; SC10, para la profundidad 0.25 m, SC5 para la profundidad 0.35 m y SC8 para la profundidad 0.45 m.

Las características de la zona crítica subsuperficial de la ladera orientada al norte, mencionadas anteriormente, derivan en un tiempo de residencia de agua en el suelo muy inferior en esta ladera en comparación con la ladera orientada al sur. Martínez-Fernández y Ceballos (2003) señalaron que los perfiles que presentan un porcentaje más alto de arena son aquellos temporalmente más estables por la reducida capacidad de los suelos arenosos para retener agua. De esta forma, por las características observadas en la ladera orientada al norte, anteriormente mencionadas, estos puntos serían temporalmente más estables.

3.3. Análisis de Componentes Principales

Los dos primeros CPs explican el 97.5 % de la varianza del conjunto de datos en total (Tabla 1).

Tabla 1. Autovalores, varianza explicada, y varianza acumulada para los dos primeros componentes principales (CPs).

Parámetro	CP1	CP2
Autovalores	6.47	0.35
Varianza	92.45	5.05
Varianza (acumulada)	92.45	97.50

Los pesos, *loadings*, expresan la importancia de los CPs en la explicación de la varianza de cada variable del conjunto de datos de entrada, esto es, para la serie temporal de humedad del suelo medida en 7 localizaciones (SC4_AVG-SC10_AVG). Para el CP₁ estos valores son negativos y constantes para todas las variables (≤ -0.37), por lo que se deduce que ninguna variable contribuye en mayor medida en este CP (Fig. 5). Sin embargo, al contribuir todas en la misma dirección se consigue explicar un alto porcentaje de la varianza. Para el CP₂ los *loadings* tienen valores positivos muy altos para las variables SC9_AVG y SC10_AVG (≥ 0.46) y negativos para SC6_AVG y SC7_AVG (≤ -0.48).

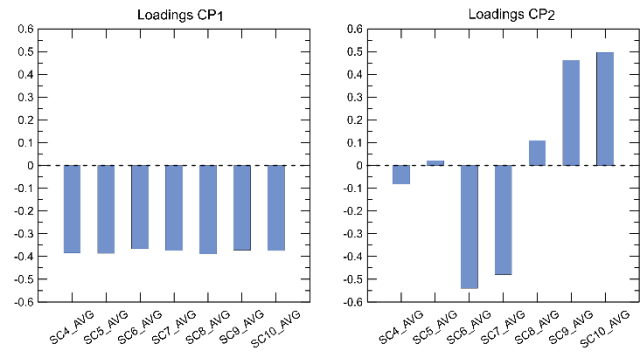


Fig. 5. Pesos, loadings del componente principal 1 (CP₁) y del componente principal 2 (CP₂). En cada gráfico se representa el conjunto de variables (SC4_AVG – SC10_AVG).

La Fig. 6 muestra el mapa factorial del ACP determinado por el CP₁ y el CP₂ del conjunto de datos. Los ejes principales del ACP representan el 92.5 % y el 5.1%, respectivamente, de la variación total. Las observaciones de la humedad del suelo indican una clara agrupación, en el biplot que combina scores y *loadings*, correspondientes a los periodos húmedo y seco. En general, SC10_AVG y SC8_AVG son las variables que contribuyen más la variabilidad en ambos componentes principales (Fig.6).

El hecho de que el 92.5 % de la variabilidad haya sido captada por el CP₁ en la Fig. 6 sugiere que un solo componente puede explicar gran parte del patrón espacial y temporal de la humedad del suelo. El CP₁ divide las observaciones en tres grupos claramente diferenciados a lo largo del eje x, correspondientes a los periodos seco, húmedo e intermedio, lo que podría indicar que el CP₁ corresponde al efecto del clima en la humedad del suelo. El hecho de que los pesos tengan valores negativos para este CP y que las observaciones correspondientes al periodo húmedo y seco den valores negativos y positivos, respectivamente, en el eje de abscisas, hace que el CP₁ pueda interpretarse como una consecuencia de escasez de lluvia, o sequía, relacionada con la estacionalidad del clima Mediterráneo, con un estiaje veraniego prolongado. Este fenómeno además de explicar un gran porcentaje de la variación en los datos, previamente mencionado, influye de igual forma sobre todos los puntos de medida examinados.

Los *loadings* del CP₂ diferencian muy bien los distintos puntos de medida en cuanto a su posición topográfica. Por un lado, las variables correspondientes a la humedad del suelo medida en la meseta y parte alta de la ladera (SC9_AVG y SC10_AVG) y, por otro lado, las correspondientes a la humedad del suelo medida en el valle (SC6_AVG y SC7_AVG). El CP₂ explica el 5.1 % de la varianza total y parece estar ligado a factores espacialmente variables y estables en el tiempo, que se podría interpretar como ausencia o falta de flujo subsuperficial consecuencia del efecto de la topografía y de las propiedades del suelo. En los puntos SC6 y SC7 se ha observado una contribución negativa, lo que implica un efecto considerable del flujo subsuperficial y en los puntos SC9 y SC10 el efecto contrario. Se puede distinguir entre ambas laderas. Por un lado, la ladera

orientada al norte en la que bajo el perfil del suelo se extiende una zona de material altamente meteorizado, previamente mencionado y, por otro lado, la ladera orientada al sur en la que bajo el perfil del suelo somero subyace directamente la roca madre. Esto podría explicar por qué en el punto SC4 también hay efecto de flujo subsuperficial. En las posiciones intermedias en cada ladera, SC5 y SC8, el efecto es mínimo.

En un trabajo previo conducido en esta zona de estudio en condiciones secas solo se encontró una relación significativa de la humedad del suelo con el Índice Topográfico de Humedad (TWI) mientras que para condiciones húmedas la relación fue significativa únicamente con la densidad aparente (García-Gamero et al., 2021). Kim & Barros (2002), en su estudio realizado para explicar la estructura espacial de la humedad del suelo, examinada mediante imágenes a gran escala obtenidas durante el experimento de Hidrología en la región de las Grandes llanuras del sur (EEUU) 1997 (SGP'97), advirtieron que la topografía dominaba la estructura espacial de la humedad del suelo durante la lluvia. Yoo & Kim (2004) también constataron, en sus estudio con dos conjuntos de datos del mismo experimento, reducidos a escala de campo, la importancia de los factores relacionados con la topografía. Sin embargo, ambos estudios destacaban que en los periodos entre chubascos y de sequía, otros factores como las propiedades del suelo y la vegetación dominan la evolución de la humedad del suelo.

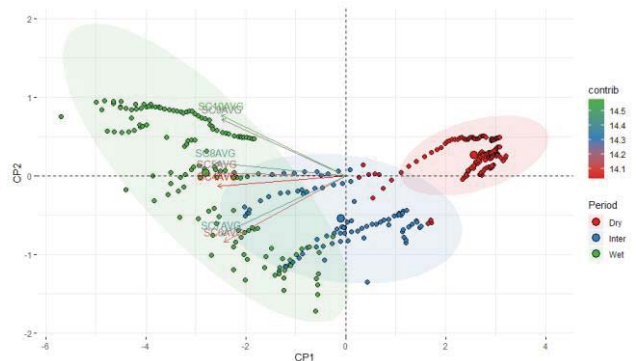


Fig. 6. Análisis de componentes principales (ACP) que muestra los dos ejes principales de variabilidad de las variables de humedad del suelo CP₁ y CP₂. Las elipses agrupan las observaciones por periodo: Seco, Intermedio y húmedo. Las variables se indican con flechas trazadas desde el origen, que indican su “peso” en diferentes direcciones. Las variables que más contribuyen a los PC son resaltadas siguiendo un gradiente de color.

4.- Conclusiones

El análisis de estabilidad temporal de la humedad del suelo en dos laderas opuestas de una dehesa del norte de la provincia de Córdoba refleja como los puntos de monitorización localizados en la ladera orientada al norte muestran, generalmente, una mayor estabilidad temporal para las 5 profundidades distintas en las que se toman medidas de la humedad del suelo. Por el

contrario, son los puntos localizados en el valle aquellos que presentan una menor estabilidad temporal.

Se aplicó un ACP al conjunto de datos de humedad del suelo medida en los 7 puntos de monitorización durante 3 años. Dos CPs independientes describen 97.5% de la varianza total del conjunto de datos.

El patrón dominante CP₁, que explica el 92.5% de la varianza, puede identificarse con el clima. Mientras que el CP₂, que explica el 5.1%, puede identificarse con la topografía.

Agradecimientos. Este trabajo forma parte del proyecto de investigación “Estableciendo un Observatorio de la Zona Crítica para la Hidropedología y Agricultura Sostenible en el Mediterráneo” (AGL2015-65036-C3-2-R), financiado por el Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación orientada a los retos de la sociedad 81/150 para el cuatrienio 2016-2020. La primera autora agradece al Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades la concesión de un contrato predoctoral FPU. Se agradece también al propietario y trabajadores de la finca Santa Clotilde facilitar el acceso y trabajo en ella. Juan Carlos Cuerva, Manuel Morón, Mario Ramos, Cristian Cuesta y Abraham Castillo colaboraron en la puesta a punto de la instalación y su mantenimiento.

5.- Bibliografía

- Brocca, L., Melone, F., Moramarco, T., y Morbidelli, R. 2009. Soil moisture temporal stability over experimental areas in Central Italy. *Geoderma*, 148(3-4), 364-374. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.11.004>
- Brocca, L., Melone, F., Moramarco, T., y Morbidelli, R. 2010. Spatial - temporal variability of soil moisture and its estimation across scales. *Water Resources Research*, 46, 1-14. <https://doi.org/10.1029/2009WR008016>
- Brutsaert, W. 2005. *Hydrology: An Introduction*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511808470>
- Carpintero, E., Andreu, A., Gómez-Giráldez, P. J., Blázquez, Á., y González-Dugo, M. P. 2020. Remote-Sensing-Based Water Balance for Monitoring of Evapotranspiration and Water Stress of a Mediterranean Oak – Grass Savanna. *Water*.
- Carracedo, M., Paquette, J. L., Alonso Olazabal, A., Santos Zalduegui, J. F., de Garcia de Madinabeitia, S., Tiepolo, M., y Gil Ibarra, J. I. 2009. U-Pb dating of granodiorite and granite units of the Los Pedroches batholith. Implications for geodynamic models of the southern Central Iberian Zone (Iberian Massif). *International Journal of Earth Sciences*, 98(7), 1609-1624. <https://doi.org/10.1007/s00531-008-0317-0>
- Choi, M., y Jacobs, J. M. 2007. Soil moisture variability of root zone profiles within SMEX02 remote sensing footprints. *Advances in Water Resources*, 30, 883-896. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2006.07.007>
- Fry, J. E., y Guber, A. K. 2020. Temporal stability of field-scale patterns in soil water content across topographically diverse agricultural landscapes. *Journal of Hydrology*, 580(July 2019), 124260. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124260>
- García-Gamero, V., Peña, A., Laguna, A. M., Giráldez, J. V., y Vanwallegghem, T. 2021. Factors controlling the asymmetry of soil moisture and vegetation dynamics in a hilly mediterranean catchment. *Journal of Hydrology*, 598(October 2020), 126207. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126207>
- Jawson, S. D., y Niemann, J. D. 2007. Spatial patterns from EOF analysis of soil moisture at a large scale and their dependence on soil , land-use , and topographic properties. *Advances in Water Resources*, 30, 366-381. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2006.05.006>
- Kim, G., y Barros, A. P. 2002. Space-time characterization of soil moisture from passive microwave remotely sensed imagery and ancillary data. *Remote Sensing of Environment*, 81(2-3), 393-403. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00014-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00014-7)
- Kim, K.-Y. 1996. Sensitivity of a linear detection procedure to the accuracy of empirical orthogonal functions. *Journal of*

- Geophysical Research Atmospheres*, 101(18), 23423–23432. <https://doi.org/10.1029/96jd02383>
- Lin, H. 2006. Temporal Stability of Soil Moisture Spatial Pattern and Subsurface Preferential Flow Pathways in the Shale Hills Catchment. *Vadose Zone Journal*, 2000, 317–340. <https://doi.org/10.2136/vzj2005.0058>
- Martínez-Fernández, J., y Ceballos, A. 2003. Temporal Stability of Soil Moisture in a Large-Field Experiment in Spain. *Soil Sci Soc Am J*, 1647–1656. <https://doi.org/10.2136/sssaj2003.1647>
- Martini, E., Wollschläger, U., Musloff, A., Werban, U., Zacharias, S., Martini, E., y Werban, U. 2017. Principal Component Analysis of the Spatiotemporal Pattern of Soil Moisture and Apparent Electrical Conductivity. *Vadose Zone J.*, 16. <https://doi.org/10.2136/vzj2016.12.0129>
- Nimmo, J. R., Survey, U. S. G., y Park, M. 2012. Preferential flow occurs in unsaturated conditions †. *Hydrological Processes*, 789, 786–789. <https://doi.org/10.1002/hyp.8380>
- Olea, L., y San Miguel-Ayanz, A. 2006. The Spanish dehesa, a traditional Mediterranean silvopastoral system. *21st General Meeting of the European Grassland Federation*, April, 1–15.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., y McMahon, T. A. 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 1633–1644.
- Perry, M. A., y Niemann, J. D. 2007. Analysis and estimation of soil moisture at the catchment scale using EOFs. *Journal of Hydrology*, 388–404. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.10.014>
- Robinson, D. A., Campbell, C. S., Hopmans, J. W., Hornbuckle, B. K., Jones, S. B., Knight, R., Odgen, F., Selker, J., y Wendroth, O. 2008. Soil Moisture Measurement for Ecological and Hydrological Watershed-Scale Observatories: A Review. *Vadose Zone Journal*. <https://doi.org/10.2136/vzj2007.0143>
- Román-Sánchez, A., Vanwalleghem, T., Peña, A., Laguna, A., y Giraldez, J. V. 2018. Controls on soil carbon storage from topography and vegetation in a rocky, semi-arid landscapes. *Geoderma*, 311, 159–166. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.10.013>
- RStudioTeam. 2020. *RStudio: Integrated Development for R*. RStudio, PBC, Boston, MA. <http://www.rstudio.com/>
- Vachaud, G., Passerat De Silans, A., Balabanis, P., y Vauclin, M. 1985. Temporal Stability of Spatially Measured Soil Water Probability Density Function. *Soil Science Society of America Journal*, 49(4), 822–828. <https://doi.org/10.2136/sssaj1985.03615995004900040006x>
- Vanderlinden, K., Vereecken, H., Hardelauf, H., Herbst, M., Martínez, G., Cosh, M. H., y Pachepsky, Y. A. 2012. Temporal Stability of Soil Water Contents: A Review of Data and Analyses. *Vadose Zone Journal*, 11(4), vzj2011.0178. <https://doi.org/10.2136/vzj2011.0178>
- Yoo, C., y Kim, S. 2004. EOF analysis of surface soil moisture field variability. *Advances in Water Resources*, 27, 831–842. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2004.04.003>
- Zhang, Y., Zhang, Z., Ma, Z., Chen, J., Akbar, J., Zhang, S., Che, C., Zhang, M., y Cerdà, A. 2018. A review of preferential water flow in soil science. *Canadian Journal of Soil Science*, 618(August), 604–618.
- Zhao, Y., Peth, S., Wang, X. Y., Lin, H., y Horn, R. 2010. Controls of surface soil moisture spatial patterns and their temporal stability in a semi-arid steppe. *Hydrological Processes*, 24(18), 2507–2519. <https://doi.org/10.1002/hyp.7665>